

Nowe przetworniki strunowe i ich zastosowanie

ADAM KANCIRUK

Instytut Mechaniki Górotworu PAN, ul. Reymonta 27; 30-059 Kraków

Streszczenie

W opracowaniu przedstawiono 2 przetworniki strunowe: ekstensometr i inklinometr. Ekstensometr jest przeznaczony do pomiarów przemieszczeń gruntu, jest urządzeniem hermetycznym, niewrażliwym na wpływ środowiska. Po wstępnym przetestowaniu został zainstalowany na terenie jednej z górnośląskich kopalń, gdzie z powodzeniem funkcjonuje wspólnie z automatycznym strunowym miernikiem – rejestratorem. Nowa metoda instalacji została również po raz pierwszy zastosowana. Inklinometr jest urządzeniem prototypowym, ale spełniającym w pełni założenia projektowe. Może być również zainstalowany razem z miernikiem – rejestratorem do obserwacji wpływu eksploatacji górniczej na obiekty budowlane.

Słowa kluczowe: przetworniki pomiarowe strunowe, geotechnika

Wstęp

W systemach, w których sygnał wejściowy jest przetwarzany kolejno przez połączone ze sobą szeregowo podzespoły, o jakości całego systemu decyduje często jakość podzespołu pierwszego od wejścia. Tak jest np. w radiowych lub telewizyjnych systemach odbiorczych. Użycie niewystarczającej jakości anteny nie zagwarantuje wysokiej jakości odbioru, nawet przy użyciu technologicznie najnowocześniejszych radioodbiorników, czy telewizorów. Podobnie jest w przypadku systemów do pomiaru wartości dowolnej wielkości fizycznej. Wejściowym podzespołem systemów pomiarowych jest zawsze przetwornik, przetwarzający wielkość mierzoną, najczęściej nieelektryczną na wielkość elektryczną, np. napięcie, częstotliwość. Zazwyczaj jest on urządzeniem elektromechanicznym. Postęp w konstrukcji przetworników jest nieporównanie wolniejszy niż w konstrukcji dalszych podzespołów systemu pomiarowego, zwłaszcza elektronicznych cyfrowych. Poza tensometrami naprężnymi elektrozestancyjnymi i termorezystorami nie ma możliwości wykonywania wielu części przetwornika w jednym procesie technologicznym, jak w przypadku układów scalonych. Dlatego precyzyjne przetworniki pomiarowe stosowane w pracach badawczych wykonywane są z wysokiej jakości materiałów, produkowane w niewielkich seriach i wzorcowane najczęściej indywidualnie. Wszystkie te czynniki powodują, że zakup ich wymaga zainwestowania pokaźnych funduszy.

1. Strunowy dylatometr

Przykładem bardzo prostego przetwornika strunowego przemieszczenia jest „miernik szczelin, pęknięć” (crackmeter) typu 4420 (rys. 1) produkowany przez firmę Geokon (USA). Jest on przeznaczony do pomiaru rozwarości szczelin dylatacyjnych, lub pęknięć konstrukcji budowlanych. Zatem w języku polskim można go krótko nazwać „dylatometr”. Zawiera on, jak wszystkie przetworniki strunowe, strunę pomiarową (wewnątrz obudowy **2**) i współpracujący z nią elektromagnes **3**. Zmiana odległości pomiędzy zakotwieniami **1** powoduje zmianę naciągu spiralnej sprężyny znajdującej się we wspólnej obudowie **2** ze struną i w konsekwencji zmianę naciągu tej ostatniej. Zakres pomiarowy przyrzędu przy bazie 300 mm wynosi 12.5 mm, co dla egzemplarza o numerze fabrycznym 6158 odpowiada zmianie częstotliwości drgań struny w przedziale 1453÷2697 Hz [1]. Dzięki prostej budowie dylatometr 4420 jest jednym z najtańszych przetworników wspomnianej firmy, choć obecnie kosztuje ok. 2500 PLN.

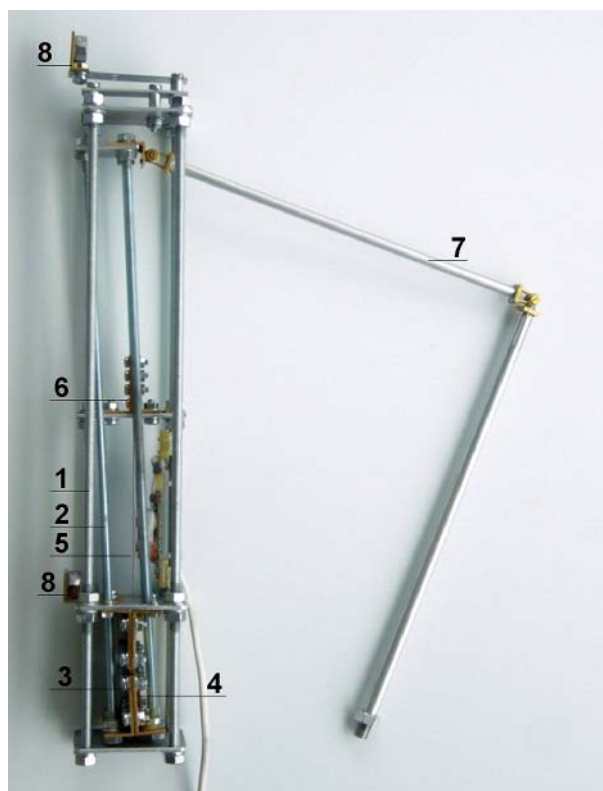


Rys. 1. Dylatometr typu 4420 firmy Geokon

Obudowa **2** przetwornika jest hermetyczna, ale zbyt delikatna do umieszczenia w gruncie. Dlatego do pomiaru przemieszczenia gruntu potrzebny jest przetwornik przemieszczenia o solidniejszej budowie.

2. Strunowy ekstensometr dźwigniowy

Rysunek 2 przedstawia układ mechaniczny przetwornika przemieszczenia, który można nazwać krócej ekstensometrem, wykonany przez autora w oparciu o prototyp skonstruowany w roku ubiegłym [2]. Układ ten, zamknięty w odpowiedniej obudowie może być umieszczony w gruncie. Do jego budowy wykorzystano niedrogie, ogólnie dostępne w handlu materiały metalowe, takie jak gwintowane pręty, kształtowniki, struna gitarowa, płaska sprężyna oraz śruby i nakrętki.



Rys. 2. Układ mechaniczny dźwigniowego ekstensometru strunowego

Korpus ekstensometru **1** został wykonany z odpowiednich odcinków prętów gwintowanych M6 połączonych 3 jarzmami (płytkami aluminiowymi). Podobnie, z prętów M5 została wykonana dźwignia **2**. Jest ona połączona z korpusem, ze środkowym jego jarzmem za pośrednictwem bezluzowego i bezhistereowego przegubu **3**, złożonego z odcinków mosiężnego kątownika i sprężystych płytek odciętych z płaskiej sprężyny zegarowej. Do dolnej części przegubu jest przykręcony również dolny zacisk **4** struny pomiarowej **5**. Podobny górny zacisk **6** (między prętami dźwigni) jest przykręcony do korpusu.

Częstotliwość drgań struny pomiarowej można wyliczyć z prostego wzoru: [3]

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E}{\gamma}} \varepsilon \quad (1)$$

gdzie:

- f – częstotliwość drgań struny pomiarowej [Hz],
- l – długość struny pomiarowej [m],
- E – moduł Younga materiału, z jakiego wykonana jest struna [Pa],
- γ – gęstość materiału struny [kg/m^3],
- ε – odkształcenie struny [m/m].

Z doświadczeń wynika, że stalowe struny stosowane powszechnie w instrumentach muzycznych, jako struny pomiarowe pracują najlepiej przy naciągach odpowiadających ich odkształceniom w granicach 1.5÷2.5%. Zatem dla następujących parametrów:

- $l = 0.13$ m,
- $E = 220$ GPa [3],
- $\gamma = 7800$ kg/m^3 [3],
- $\varepsilon = 2\%$.

częstotliwość drgań własnych struny wynosi:

$$f = \frac{1}{2 \cdot 0.13} \sqrt{\frac{220 \cdot 10^9}{7800}} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \text{ Hz, zatem: } f = 913.5 \text{ Hz} \quad (2)$$

Niech odkształcenie $\varepsilon = 2\%$ odpowiada przemieszczeniu górnego końca dźwigni **2** ekstensometru do połowy jego zakresu pomiarowego, wynoszącego ± 10 mm (rys. 2). Dla:

- $L = 260$ mm – czynna długość dźwigni,
- $d = 1.95$ mm – odległość struny pomiarowej **5** od osi przegubu **3**,

przekładnia dźwigni n jest równa 133.3. Zatem przemieszczenie końca dźwigni o $D = 10$ mm (do krańców zakresu pomiarowego) spowoduje zmianę odkształcenia struny o:

$$\Delta \varepsilon = \frac{d}{L} \cdot \frac{D}{l}, \text{ zatem } \Delta \varepsilon = \frac{1.95}{260} \cdot \frac{10}{130} = 0.000577 \text{ m/m} \quad (3)$$

czyli 0.577‰. Dla przemieszczenia $D = -10$ mm wynik jest równy -0.577% . Stąd zakres zmian odkształcenia struny zawiera się w granicach $\varepsilon_d = 1.423$ i $\varepsilon_g = 2.577\%$. Tym wartościom odpowiadają częstotliwości jej drgań własnych odpowiednio $f_d = 770.5$ i $f_g = 1037$ Hz. Wychylenie końca dźwigni jest przekształcane w przybliżeniu proporcjonalnie na odkształcenie struny, które z kolei jest proporcjonalne do kwadratu częstotliwości jej drgań własnych. Dlatego czułość S przyrządu należy wyrażać jako zależność przyrostu kwadratu częstotliwości drgań struny do przyrostu przemieszczenia końca dźwigni. Teoretycznie wynosi ona zatem:

$$S = \frac{f_g^2 - f_d^2}{2D} \text{ kHz}^2/\text{mm, czyli } S = \frac{1.037^2 - 0.7705^2}{2 \cdot 10} = 0.0239 \text{ kHz}^2/\text{mm} \quad (4)$$

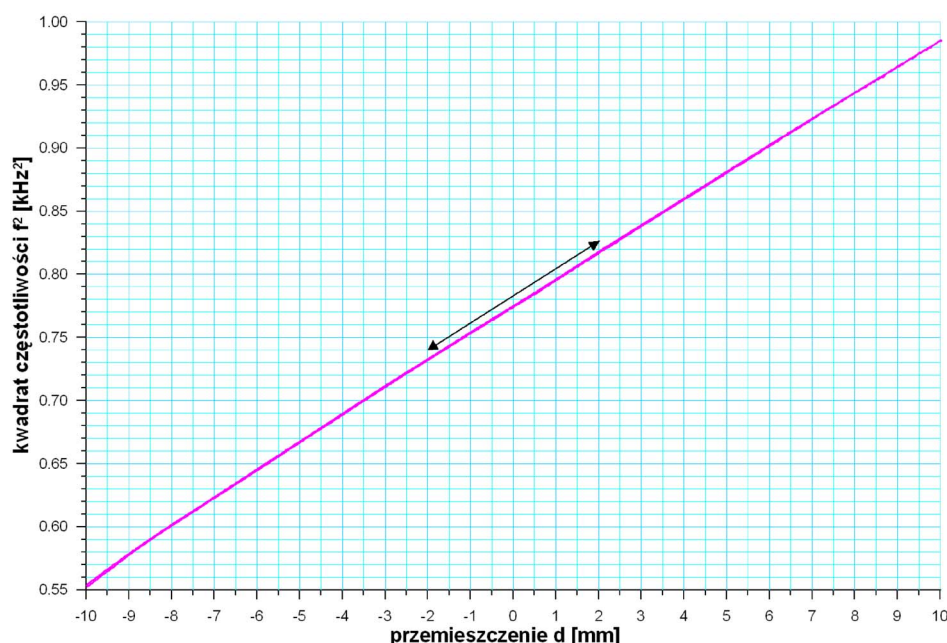
Koniec dźwigni połączony jest przegubowo z łącznikiem **7** – dwoma odcinkami rurki aluminiowej, które po ustawieniu w położeniu w przybliżeniu prostopadłym do korpusu **1** pośredniczą w przekazywaniu przemieszczenia gruntu na dźwignię **2**. Siła reakcji dźwigni przy jej maksymalnym wychyleniu nie przekracza 1 N. Korpus **1** mocowany jest do zakotwienia dwoma uchwytemi **8**, jednym (górnym) elastycznym.

Wymiary układu mechanicznego przetwornika zostały dobrane tak, aby można było go umieścić w obudowie wykonanej z typowych elementów używanych w instalacjach kanalizacyjnych (trójnik, mufa, zaślepki, odcinek rury). Elementy te wykonane są z bardzo odpornego na wpływ środowiska polichlorku winylu (PVC), i zawierają gumowe uszczelniacze. Dla jeszcze lepszej hermetyzacji ekstensometru elementy te zostały dodatkowo sklezione. Łącznik **7** został osłonięty gumowym mieszkiem – elementem sprzętu AGD. Szczelność obudowy została sprawdzona z wynikiem pozytywnym przez zanurzenie całego ekstensometru w wodzie. Koszt materiałów użytych do jego budowy jest rzędu kilkudziesięciu PLN.

3. Wzorcowanie ekstensometru

Wzorcowanie przyrządu pomiarowego ma na celu zweryfikowanie jego parametrów metrologicznych z teoretycznymi założeniami konstrukcyjnymi, oraz określenie błędów pomiarowych. Wzorcowanie ekstensometru zostało przeprowadzone w urządzeniu do badań wytrzymałościowych INSTRON 8500, które jest w stanie zadawać przemieszczenie i mierzyć jego wartość z rozdzielczością 1 μm . Do tego celu wykonano odpowiednie uchwyty. Pomiar i rejestrację okresu drgań struny pomiarowej realizowano przy użyciu zmodyfikowanego miernika strunowego KA-7D. Jest on w stanie mierzyć okres drgań struny z rozdzielczością 40 ns i rejestrować wynik pomiaru co 3 sekundy.

Zarówno praca miernika, jak i maszyny Instron jest synchronizowana generatorami kwarcowymi, możliwe było zatem czasowe skorelowanie wyników pomiaru przemieszczenia i okresu drgań struny. Rysunek 3 przedstawia wynik wzorcowania przetwornika: charakterystykę przemieszczenie – kwadrat częstotliwości.



Rys. 3. Charakterystyka ekstensometru

Przemieszczeniom -10 mm (dolny kraniec zakresu pomiarowego), 0 (środek zakresu pomiarowego) i 10 mm (górny kraniec zakresu pomiarowego) odpowiadają następujące wartości częstotliwości drgań struny pomiarowej i ich kwadraty:

przemieszczenie d [mm]	częstotliwość f [Hz]	kwadrat częstotliwości f^2 [kHz ²]
-10	744	0.553
0	880	0.774
10	992	0.985

Zatem faktyczna czułość przyrządu wynosi:

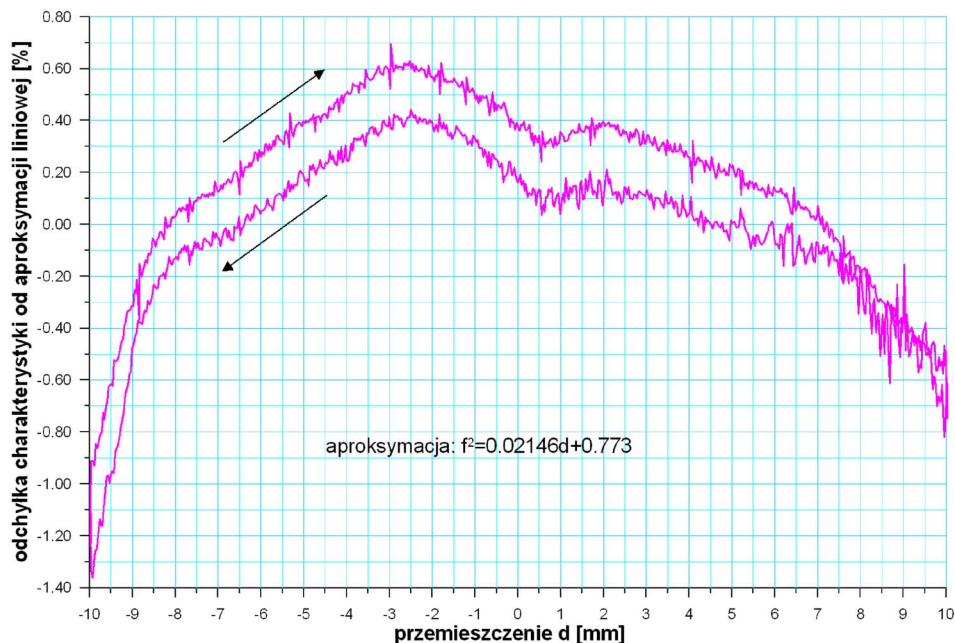
$$S = \frac{f_g^2 - f_d^2}{2D} \text{ kHz}^2/\text{mm}, \text{ czyli } S = \frac{0.985 - 0.553}{2 \cdot 10} = 0.0216 \text{ kHz}^2/\text{mm} \quad (5)$$

i jest mniejsza od wyliczonej teoretycznie o niecałe 10%. Z pewnością najważniejszym czynnikiem decydującym o tej rozbieżności jest skończona sztywność dźwigni 2 ekstensometru (rys. 2).

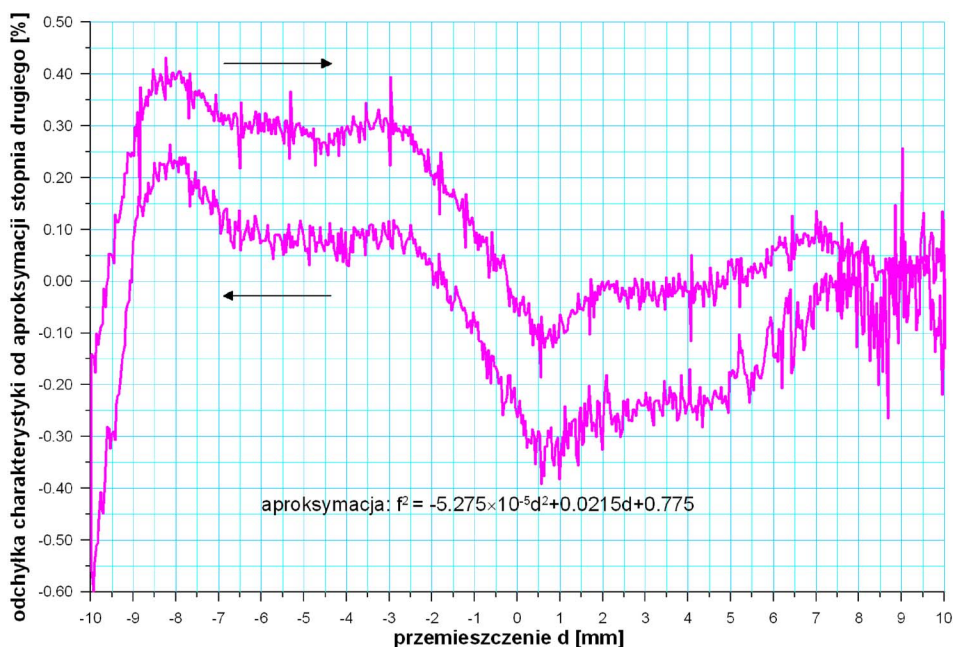
Na podstawie tego rysunku trudno określić nieliniowość i histerezę przetwornika. Rysunek 4 przedstawia odchyłkę charakterystyki przetwornika od jej liniowej aproksymacji. Największa nieliniowość występuje blisko krańców zakresu pomiarowego, dla przemieszczenia 0 mm osiąga 1.5%. Jest to zrozumiałe, gdyż koniec

górną dźwignię 2 (rys. 2) nie przemieszcza się po linii prostej, lecz po łuku. Zauważając zakres do wartości $-9 \div 10$ mm można zmniejszyć nieliniowość do 1%. Histereza w tym zakresie nie przekracza 0.3%.

Nic nie stoi na przeszkodzie, aby charakterystykę przetwornika zaaprosymować krzywą drugiego rzędu (rys. 5). Taki zabieg czyni maksymalną odchyłkę charakterystyki od jej aproksymacji mniejszą niż $\pm 0.4\%$ w zakresie $-9 \div 10$ mm. Histereza pozostaje bez zmian.



Rys. 4. Nieliniowość i histereza przy przyjęciu aproksymacji charakterystyki prostą



Rys. 5. Nieliniowość i histereza przy przyjęciu aproksymacji charakterystyki krzywą II rzędu

4. Instalacja ekstensometru w gruncie

Ekstensometr został zainstalowany na terenie poddanym wpływowi eksploatacji górniczej pokładu „133” Kopalni Węgla Kamiennego „Pokój” w Rudzie Śląskiej, w celu obserwacji przemieszczenia gruntu. Pokład „133” zalega na głębokości 455 m, jego miąższość wynosi około 2 m. Jego eksploatacja metodą ścianową rozpoczęła się 24 czerwca 2009 roku. Front eksploatacji o szerokości około 260 m przesuwiał się na północny wschód ze średnią prędkością 2.54 m/dobę, wybierając obszar o kształcie prostokąta. Na miejsce posadowienia ekstensometru wybrano niewielki skwer znajdujący się na terenie II Komisariatu Policji w Rudzie Śląskiej. Skwer ten znajduje się nad osią wybieranego obszaru, w odległości 400 metrów od miejsca, pod którym eksploatacja rozpoczęła się. Ustalono, że kierunek posadowienia ekstensometru powinien być zgodny z kierunkiem postępu frontu eksploatacji.

Najpierw w gruncie wywiercono 2 otwory o średnicy ok. 100 mm i głębokości 1.3÷1.4 m (rys. 6). Odległość między otworami – bazę pomiarową ustalono na 5 m. W otworach tych zabetonowano 2 szpilki budowlane M20 wyposażone w pierścienie centrujące (rys.7).

Po związaniu betonu między otworami wykopano rowek o głębokości ok. 0.5 m. Do jednej ze szpilek przymocowano przetwornik (rys. 8), do drugiej – prosty regulator zakresu (rys. 9).

Przetwornik i regulator zakresu połączono popychaczem – aluminiową rurką o długości 4 m zabezpieczoną przed przygnieceniem gruntem osłoną z gąbki poliuretanowej (używaną do termicznej izolacji rur wodociągowych) i elastyczną osłoną do przewodów elektrycznych tzw. peszlem. Zabezpieczenie to widoczne jest na rysunku 9. Po ustawieniu przetwornika w połowie zakresu pomiarowego cały wykop zasypano piaskiem i ziemią.



Rys. 6. Wiercenie otworów w gruncie



Rys. 7. Zabetonowana w otworze szpilka

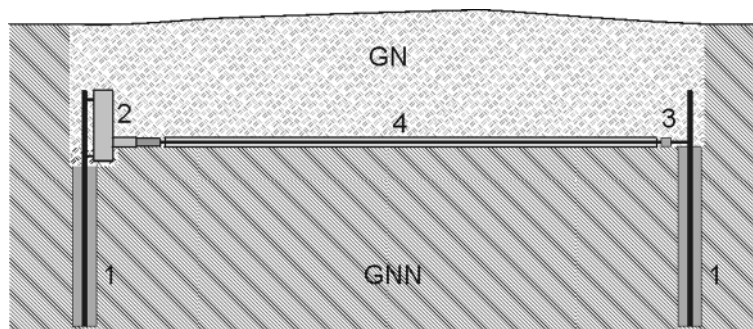


Rys. 8. Przetwornik przykręcony do szpilki



Rys. 9. Regulator zakresu

Schematyczny układ ekstensometru w gruncie obrazuje rysunek 10. Należy zwrócić uwagę, że położenie szpilek, 1 do których zamocowane są ekstensometr 2 i regulator zakresu 3 jest ustabilizowane w gruncie GNN tylko nieznacznie naruszonym przez wiercenie otworów, przez co okres stabilizacji gruntu w najbliższym sąsiedztwie układu pomiarowego, po jego instalacji został zmniejszony do minimum. Bardzo niewielkie jest też poziome parcie układu na grunt. Gwarantuje to wierne przekazywanie jego przemieszczeń na przetwornik. Tuż obok przetwornika zainstalowano też strunowy termometr. Równoczesny z przemieszczeniem pomiar temperatury gruntu ma na celu m in. termiczną korektę wskazań ekstensometru.



Rys. 10. Układ ekstensometru w gruncie: 1 – zabetonowane szpilki, 2 – ekstensometr, 3 – regulator zakresu, 4 – popychacz w osłonie, GNN – grunt nienaruszony, GN grunt naruszony

5. Pierwsze wyniki pomiarowe

Z początku, w dniach 13 sierpnia i 23 września, gdy front eksploatacji pokładu węgla znajdował się w odległości 273 i 164 m od układu pomiarowego wykonano pomiary ręcznie, przy użyciu miernika strunowego KA-3D (rys. 11), przyrządu wciąż sprawnego, choć wykonanego w latach 80-tych XX wieku. Zbudowany z użyciem półprzewodnikowych elementów dyskretnych, układów scalonych CMOS małej i średniej skali integracji i wyświetlacza kalkulatorowego LED pozwala jedynie na wizualny odczyt wyniku pomiaru – wartości okresu drgań struny pomiarowej podłączonego doń przetwornika.



Rys. 11. Miernik strunowy KA-3D

Bazując na nowocześniejszym, mikroprocesorowym mierniku KA-7D (rys. 12) [4] skonstruowano miernik – rejestrator (rys. 13) dostosowany do umieszczenia w gruncie, w bezpośrednim sąsiedztwie przetworników. Miernik ten, po wstępnym zaprogramowaniu, może w pełni automatycznie wykonywać pomiary i rejestrować ich wyniki. Dodatkowym jego podzespołem jest układ przekaźnika, pozwalający na naprzemienne podłączenie do wejścia zespołu układów analogowych (wzmacniacz i generator impulsu wzbudzającego) dwóch przetworników: ekstensometru i termometru strunowego. Miernik posiada zasilanie bateryjne wystarczające na ok. 40-dniową pracę. Zastosowany jako obudowa popularny hermetyczny pojemnik zapewnia wystarczające zabezpieczenie układów miernika przed zamknięciem w gruncie. Przewody elektryczne do przetworników przeprowadzono przez starannie uszczelniony przepust. Pamięć miernika, o pojemności 4000 dwubajtowych wyników pomiarowych zapewnia z powodzeniem zarejestrowanie danych

pomiarowych z obu przetworników w 40-dniowym okresie funkcjonowania przyrządu, powtarzając pomiary co 45 minut. Po okresie tym miernik musi być wydobyty z gruntu w celu skopiowania zebranych danych do przenośnego komputera. Po skasowaniu pamięci miernika i wymianie baterii może on być ponownie zakopany w gruncie dla dalszych rejestracji.



Rys. 12. Miernik strunowy KA-7D



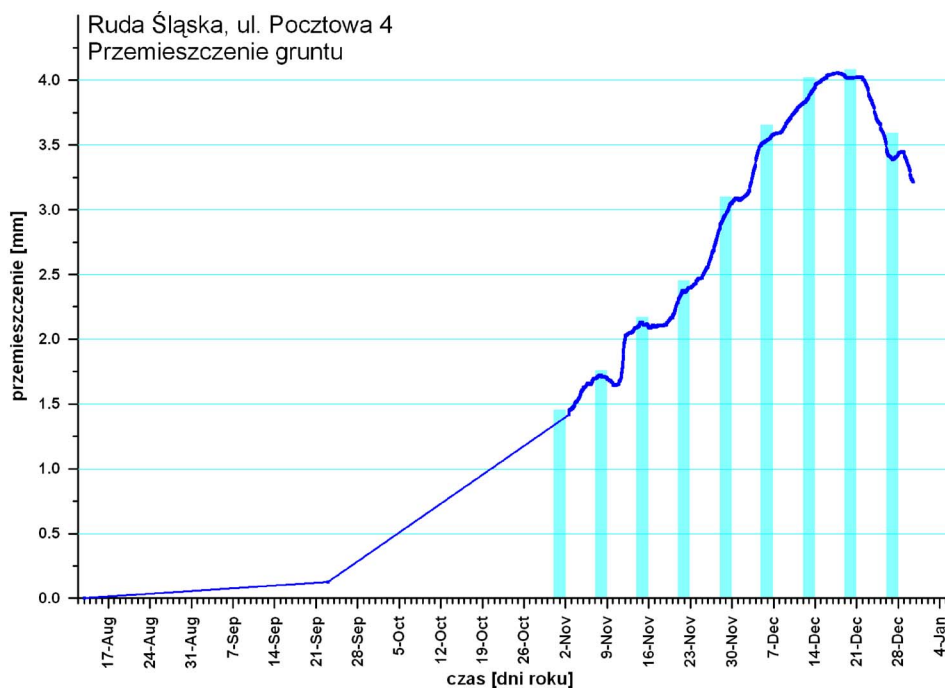
Rys. 13. Miernik – rejestrator strunowy

Automatyczny miernik – rejestrator rozpoczął swoją pracę 2 listopada 2009 roku. Wówczas front eksploatacji znajdował się 67 m od miejsca zainstalowania ekstensometru. Miesiąc później front przeszedł pod tym miejscem. Rysunek 14 przedstawia wykres zarejestrowanego przemieszczenia gruntu jako funkcji czasu (w tym ręcznie odczytane wyniki 13 sierpnia i 23 września). W miarę przybliżania się frontu eksploatacji następuje coraz większe rozciąganie gruntu. Tendencja ta trwa aż do 16 grudnia. W dniu tym, mierzone przemieszczenie osiąga maksymalną wartość – 4.1 mm. Przy bazie pomiarowej równej 5 m odpowiada ono odkształceniu 0.62%. Następnie sytuacja zmienia się, grunt podlega stopniowemu ścisnaniu. Na wykresie, w formie „słupków” zaznaczono sobotnio – niedzielne przerwy w eksploatacji. Można zauważyć, że przerwy te manifestują się (z 1÷2 – dniowym opóźnieniem) zwolnieniem tempa zmian przemieszczenia. Podobne zaobserwowane zjawisko zostało opisane w pracy [5].

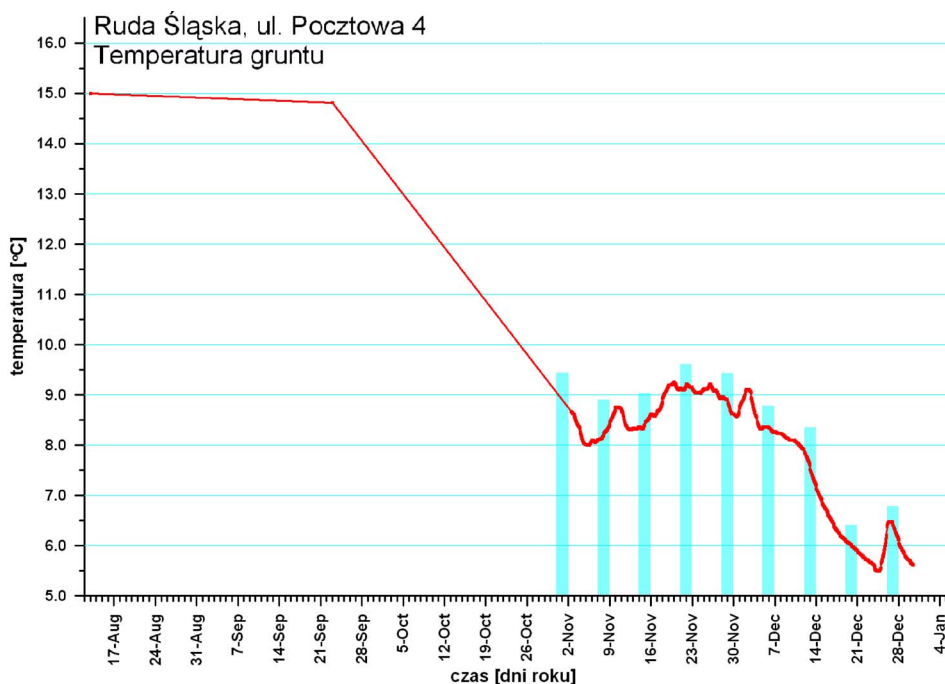
Zmiany temperatury gruntu zostały zobrazowane na rysunku 15. Wykres z opóźnieniem 3÷5 dni odzwierciedla powszechnie obserwowane zmiany temperatury powietrza. Na początku listopada widoczny jest okres kilku dni z przymrozkami, druga połowa listopada i początek grudnia jest cieplejszy, mroźna druga dekada grudnia powoduje znaczny spadek temperatury gruntu, po którym następuje krótkie „święteczne” ocieplenie.

6. Koncepcja inklinometru strunowego

Znane urządzenia do pomiaru wychyleń, w tym wykorzystujące w swej konstrukcji strunę pomiarową zawierają odpowiednio ułożyskowane wahadło. Przykładem takiego urządzenia jest produkowany niegdyś w Polsce przez Zakład Aparatury Naukowej Uniwersytetu Jagiellońskiego „strunowy czujnik do pomiaru pochyleń kątowych typu SCK” (rys. 16). Przeznaczony jest on do pomiaru odchylenia od pionu konstrukcji budowlanych. Pod wpływem tego odchylenia, wahadło czujnika SCK wychyla się z położenia neutralnego. Wychylenie to poprzez odpowiedni układ mechaniczny przenoszone jest na strunę pomiarową, powodując zmianę jej napięcia, a w konsekwencji zmianę częstotliwości jej drgań własnych. Wahadło może



Rys. 14. Przemieszczenie gruntu jako funkcja czasu

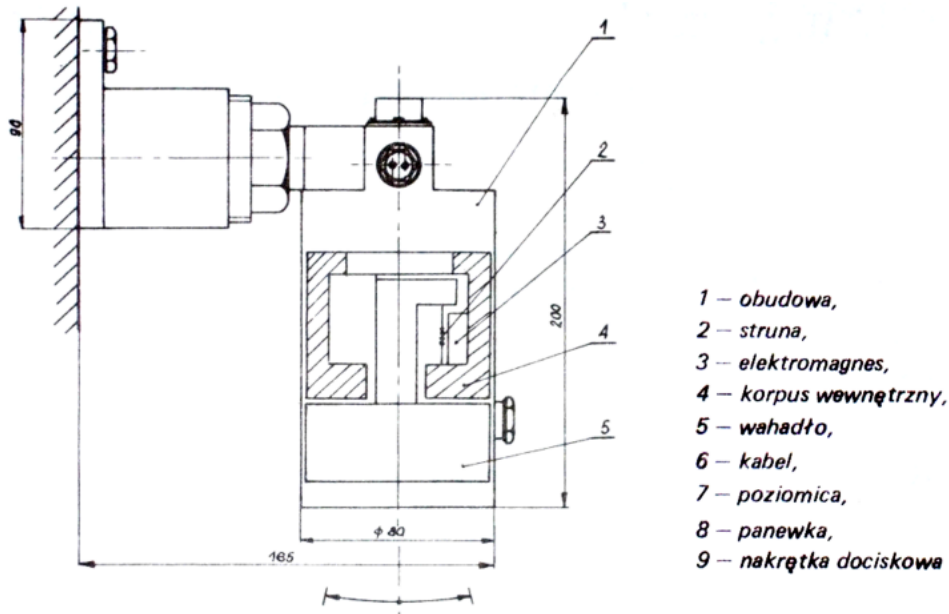


Rys. 15. Temperatura gruntu jako funkcja czasu

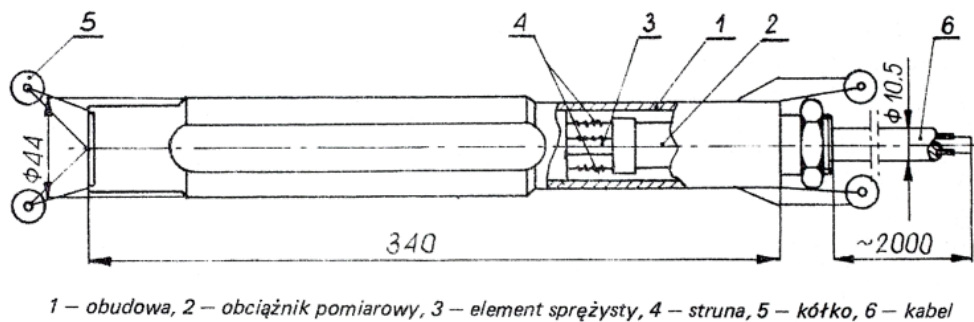
przemieszczać się tylko w jednej płaszczyźnie, zatem czujnik SCK może mierzyć odchylenia konstrukcji również tylko w jednej płaszczyźnie.

Urządzenie zawierające trzy struny i przeznaczone do pomiaru odchyień w trzech płaszczyznach – „strunowy czujnik – inklinometr typu SCIR” jest przedstawione schematycznie na rysunku 17. Wahadło – ciężarek zamontowany do sprężystej belki może wychylać się w dowolnej płaszczyźnie. Przyrząd ten jest przeznaczony do pomiaru odchyień od pionu rur umieszczanych w odwiertach i ma znacznie większy zakres pomiarowy (i mniejszą czułość) niż wspomniany poprzednio czujnik SCK.

Tymczasem struna pomiarowa, lub ich zespół jako element sprężysty może być elementem zawieszenia wahadła. Dla wyprowadzenia zależności odkształcenia strun od odchylenia od pionu całego przyrządu



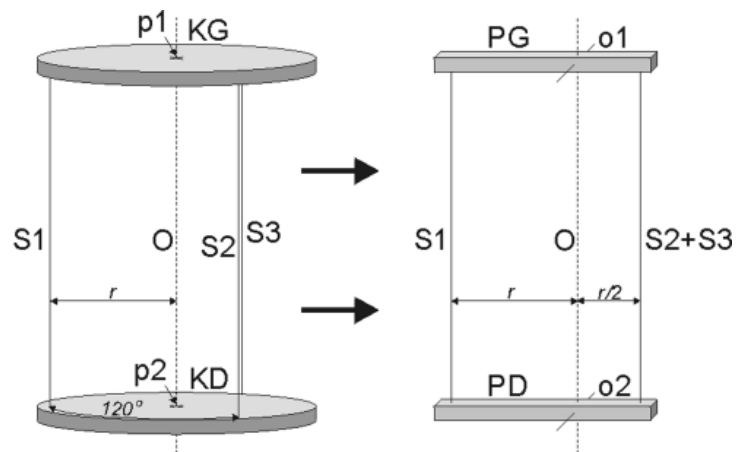
Rys. 16. Strunowy czujnik do pomiaru pochyleń kątowych typu SCK



Rys. 17. Strunowy czujnik – inklinometr typu SCIR

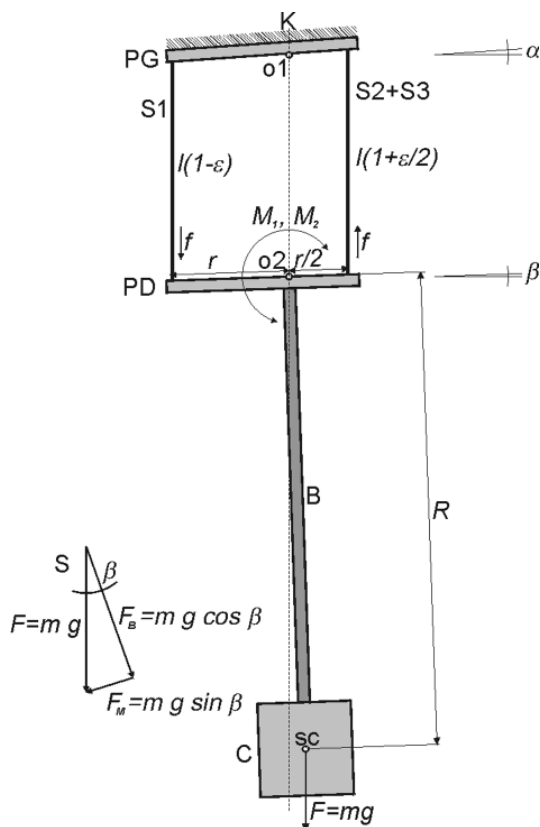
można 3-strunowy układ zawieszenia zredukować do układu 2-strunowego (płaskiego), tak jak zostało przedstawione na rysunku 18.

Z lewej strony rysunku mamy 2 krążki: górny **KG** i dolny **KD** połączone 3 strunami **S1**, **S2** i **S3**, których końce zamocowane są do krążków w jednakowej odległości r od punktów odpowiednio **p1** i **p2**, co



Rys. 18. Przejście od układu zawieszenia wahadła 3-strunowego do 2-strunowego

120°. Krążek **KD** obciążony jest wahadłem. Wychylenie układu, a więc i odchylenie od pionu jego osi **O** w dowolnej płaszczyźnie spowoduje zmianę odkształcenia strun. Przy założeniu, że płaszczyzna odchylenia jest wyznaczona przez **S1** i **O**, struny **S2** i **S3** można zastąpić jedną struną umieszczoną na tej płaszczyźnie i odległą od **O** o $r \sin 30^\circ$, czyli $r/2$. Prawa część rysunku 18 przedstawia układ zredukowany, rolę krążków przejmują płyty **PG** i **PD**, które mogą obracać się wokół osi odpowiednio **o1** i **o2**. Struna **S2+S3** ma przekrój poprzeczny 2 razy większy niż struna **S1**. Rysunek 19 obrazuje schemat inklinometru po redukcji liczby strun.



Rys. 19. Schemat inklinometru

Konstrukcja **K**, której odchylenie od pionu ma być badane połączona jest sztywno z płytą górną **PG**. Na płycie tej zawieszona jest na strunach **S1** i **S2+S3** płyta dolna **PD**, obciążona ciężarkiem **C** połączonym z nią belką **B**. Płyta dolna, belka i ciężarek stanowią sztywny zespół, którego masa m skupiona jest w środku ciężkości **sc**, odległego od osi obrotu **o2** o R . Struny natomiast wykazują zdolność do sprężystego wydłużania się, przy zupełnym braku reakcji na zginanie.

Założmy, że konstrukcja **K** i płyta górną **PG** obróciły się od położenia poziomego o kąt α , i że oś obrotu **o1** jest prostopadła do płaszczyzny rysunku. Obróci się również wokół osi **o2**, o kąt β zapewne mniejszy niż α , zespół **PD**, **B** i **C**. Siłę ciężkości F można rozłożyć na siłę F_B równoległą do belki **B** i siłę do niej prostopadłą F_M tak, jak (w przesadzie) ilustruje to schemat **S**. Siła F_M daje moment M_1 równy:

$$M_1 = Rmg \sin \beta \quad (6)$$

Równoważy go moment pochodzący od reakcji strun, zaczepionych w odległości r i $r/2$ od **o2**:

$$M_2 = 1.5rf \quad (7)$$

gdzie siła f dodaje się lub odejmuje od wstępnego naciągu strun (ciężarem **C**). Jest ona związana następującą zależnością od odkształcenia strun ε :

$$\varepsilon = \frac{f}{S} E \quad (8)$$

$$f = SE\varepsilon \quad (9)$$

gdzie S – pole przekroju struny, E – moduł Younga materiału struny. Zatem moment M_2 ze wzoru (2) wynosi:

$$M_2 = 1.5rSE\varepsilon \quad (10)$$

Ale odkształcenie strun ε jest też równe:

$$\varepsilon = \frac{r}{l}(\sin \alpha - \sin \beta) \quad (11)$$

gdzie l – długość struny. Zatem:

$$M_2 = \frac{1.5r^2SE}{l}(\sin \alpha - \sin \beta) \quad (12)$$

Momenty M_1 i M_2 są równe, stąd:

$$Rmg \sin \beta = \frac{1.5r^2SE}{l}(\sin \alpha - \sin \beta) \quad (13)$$

Z wzoru powyższego można wyliczyć $\sin \beta$:

$$\sin \beta = \frac{1.5r^2SE}{Rmgl + 2r^2SE} \sin \alpha \quad (14)$$

i podstawić go do wzoru (11). Otrzymujemy:

$$\varepsilon = \frac{Rmgr}{Rmgl + 1.5r^2SE} \sin \alpha \quad (15)$$

Dla założonych z góry parametrów R , m i l należy wyznaczyć parametr r tak, aby dla danej wartości $\sin \alpha$ odkształcenie strun ε osiągnęło wartość maksymalną, czyli aby przyrząd osiągnął optymalną czułość. Po wyliczeniu pochodnej

$$\frac{d\varepsilon}{dr} = \frac{Rmg(Rmgl - 1.5r^2SE)}{(Rmgl + 1.5r^2SE)^2} \sin \alpha \quad (16)$$

i przyrównaniu jej do zera,

$$\frac{d\varepsilon}{dr} = 0 \Rightarrow Rmgl - 1.5r^2SE = 0 \quad (17)$$

otrzymujemy wzór na optymalną wartość parametru r :

$$r = \sqrt{\frac{Rmgl}{1.5SE}} \quad (18)$$

Dla tej wartości związek $\sin \alpha$ i $\sin \beta$ wyliczony z (14) jest bardzo prosty:

$$\sin \beta = \frac{\sin \alpha}{2} \quad (19)$$

a odkształcenie strun spowodowane wychyleniem przyrządu o kąt α wynosi:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{Rmg}{6SEl}} \sin \alpha \quad (20)$$

Dla $R = 340$ mm, $m = 4.35$ kg, $l = 128$ mm, $g = 9.81$ m/s², d (średnica struny) = 0.2 mm i $E = 220$ GPa, otrzymujemy ze wzoru (18):

$$r = 13.4 \text{ mm} \quad (21)$$

a ze wzoru (20):

$$\varepsilon = 52.3 \sin \alpha [\text{‰}] \quad \text{lub} \quad \varepsilon = 0.9124 \alpha = [\text{‰/deg}] \quad (22)$$

7. Konstrukcja inklinometru

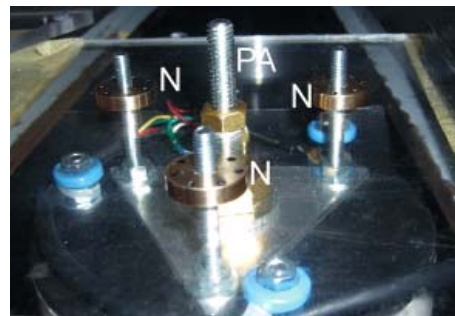
Rysunek 20 przedstawia fotografię skonstruowanego w oparciu o poczynione wyżej założenia prototypowego inklinometru strunowego, a rysunek 21 – jego górną część. 3 struny pomiarowe **S** o średnicy 0.2 mm i długości czynnej 128 mm rozpięte są pomiędzy zaciskami **ZG** i **ZD** wykonanymi z sześciokątnego pręta 24 mm i płaskownika 7×2.5 mm. Zatem struny rozmieszczone są względem osi przyrządu co 120° i odległe od niej o 12 mm. Jest to wartość wprowadzicie nieco mniejsza od wartości r podanej we wzorze (21), ale wynikający z niej czułość (teoretyczna) inklinometru jest bliska podanej we wzorze 22:

$$\varepsilon = 51.97 \sin \alpha [\text{‰}] \quad \text{lub} \quad \varepsilon = 0.907 \alpha [\text{‰/deg}] \quad (23)$$

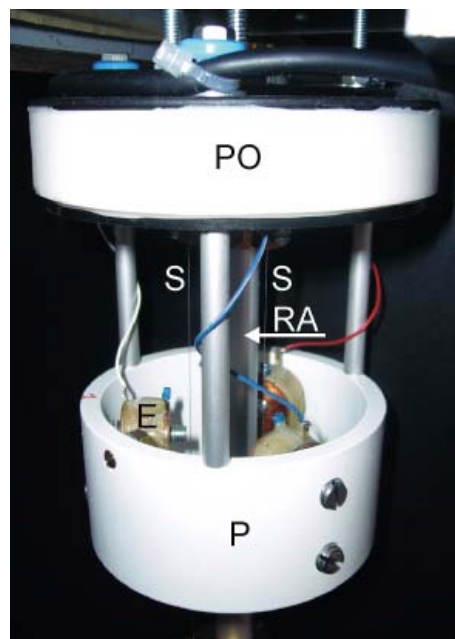
Na wewnętrznej stronie pierścienia **P** umieszczone są 3 elektromagnesy **E**. Odległości ich nabiegunków od strun można regulować przy pomocy gwintowanych wałeczków wkręconych w pierścień. Do dolnego zacisku **ZD** przymocowana jest rurka aluminiowa **R** o średnicy 12 mm i długości 300 mm spełniająca rolę belki z rys. 18. Na jej dolne gwintowane zakończenie nakręcony jest ciężarek **C** o masie (4.353 kg) dobranej tak, aby spoczynkowe odkształcenie strun wynosiło ok. 2‰. Górny zacisk strun **ZG** przykręcony jest do



Rys. 20 Prototypowy inklinometr



Rys. 21. Górna część inklinometru



Rys. 22. Zawieszenie inklinometru

3 trójkątnych płytek i górnej pokrywy obudowy **PO**. W zestaw ten wkręcone są 3 śruby M4, przy pomocy których inklinometr jest mocowany do konstrukcji, której wychylenie ma być obserwowane. Na śruby te nakręcone są specjalne nakrętki z podziałką **N** (rys. 22), do wstępnego ustawienia przyrządu. Przyrząd, w czasie gdy nie jest używany powinien być aretowany specjalnym gwintowanym prętem **PA** (wykręcanym i usuwanym na czas pomiarów), który dociska zacisk **ZD** do rurki **RA** zamocowanej trwale w **ZG** (rys. 21). Docisk ten kasuje luz między **RA** i **ZD** (ok. 0.2 mm) i odciąża struny.

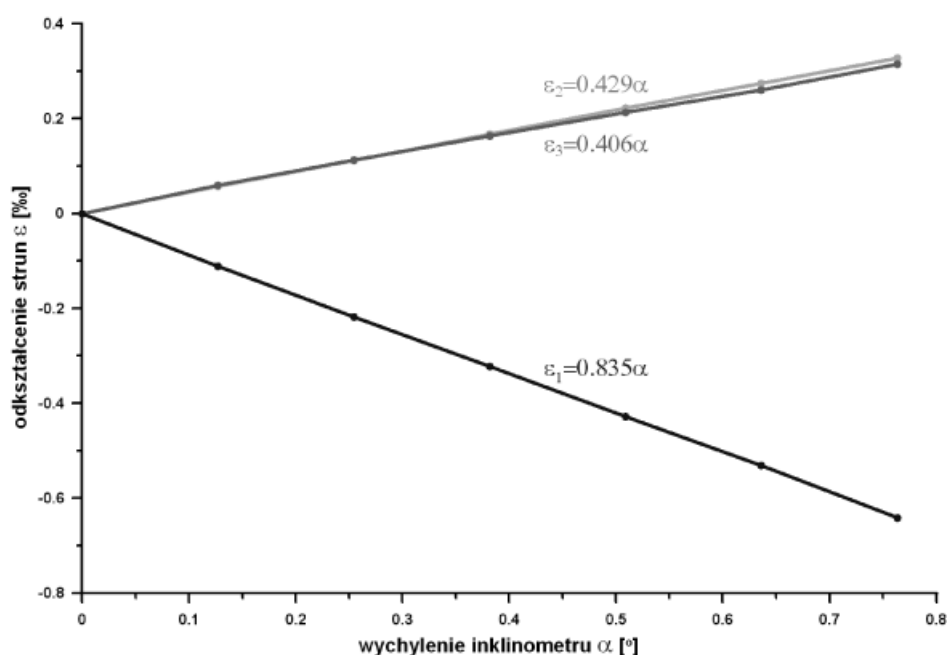
Rozmiary układu mechanicznego inklinometru zostały dobrane tak, aby jako jego obudowę można było zastosować (podobnie jak w przypadku opisanego wcześniej ekstensometru) powszechnie dostępne elementy instalacyjne z tworzyw sztucznych.

8. Wstępne sprawdzenie czułości inklinometru

Wstępne sprawdzenie czułości inklinometru przeprowadzono przy użyciu nakrętek **N** (rys. 22) i tymczasowo zaaranżowanego układu mocującego. Jako podstawę tego układu wybrano ramę maszyny wytrzymałościowej Instron 8500 o masie około 10 Mg ustawionej na początku lat 90-tych XX wieku na solidnej stopie fundamentowej. Z całą pewnością można założyć, że na czas przeprowadzenia testu podstawa ta będzie całkowicie nieruchoma.

Podziałka nakrętek **N** (rys. 22) to oznaczone lakierem 7 nawierceń na ich obwodzie. Gwint nakrętek to standardowy M4 o skoku 0.7 mm. Obrócenie nakrętki o 1/7 obrotu spowoduje więc przemieszczenie jej względem śruby o 0.1 mm. Śruby są umieszczone w wierzchołkach trójkąta równobocznego o boku 52 mm. Wysokość jego jest zatem równa 43 mm. Obrócenie 1 nakrętki o wspomniane 1/7 obrotu, powoduje zmianę nachylenia pokrywy **PO** i zacisku **PG** o kąt 0.133 stopnia. Odształcenie strun określano poprzez pomiar okresu ich drgań przy pomocy wspomnianego wcześniej miernika strunowego KA-3D. Przed testem wyregulowano wstępnie zawieszenie inklinometru tak, aby odkształcenia wszystkich strun były w przybliżeniu równe. Założono przestawianie tylko jednej nakrętki, przez co zmniejszono odkształcenie jednej struny, a pozostałych dwóch – w przybliżeniu w równym stopniu – zwiększano.

Rysunek 23 przedstawia wynik testu dla 7 położeń nakrętki, a zatem dla wychylenia zmieniającego się w granicach 0.93 stopnia. Zgodnie z założeniem odkształcenie jednej ze strun zmniejszało się, dwóch pozostałych – w niemal równym stopniu zwiększało. Czułość inklinometru ($S = 0.835\%/deg$) – zależność odkształcenia ε struny **S1** (rys. 19) od jego wychylenia α jest mniejsza tylko o 8 % od czułości wyliczonej teoretycznie (wzór 23, $S = 0.907\%/deg$). Dowodzi to, że przyjęty bardzo prosty model inklinometru okazał się w zupełności wystarczający do poprawnego zaprojektowania jego konstrukcji.



Rys. 23. Wynik wstępnego sprawdzenia czułości inklinometru

9. Podsumowanie

Przedstawione w opracowaniu 2 przyrządy pomiarowe – przetworniki strunowe przemieszczenia i wychylenia zdają się spełniać poczynione założenia konstrukcyjne. Przetwornik przemieszczenia jest w bardziej zaawansowanej fazie rozwoju, gdyż został zainstalowany na terenie poddanym wpływowi podziemnej eksploatacji górniczej i jak dotąd, z powodzeniem spełnia swoje zadanie. Nie znaczy to, aby był konstrukcją w pełni dopracowaną. Wymaga on poprawy niektórych szczegółów w celu zmniejszenia jego nieliniowości i histerezy. Do testowania przyrządu potrzebny jest też lepszy (niż tymczasowo zaaranżowany) układ testujący, sprawdzający też wrażliwość przyrządu na temperaturę. W opracowaniu przedstawionych w rozdziale 5 wynikach wpływ temperatury na wyniki pomiarowe oszacowano jedynie teoretycznie. Zastosowana po raz pierwszy (rozd. 4) nowa, prosta i tania metoda instalacji ekstensometru wydaje się być bardzo racjonalna.

Inklinometr również może być przydatny na terenach objętych eksploatacją górniczą, do pomiaru i rejestracji wychyleń np. budynków. Stanowi nowo opracowaną konstrukcję, opartą (podobnie jak ekstensometr) na powszechnie dostępnych, niedrogich, ale starannie dobranych elementach i półfabrykatak. Jego wysoka czułość, dobra liniowość i niska cena z pewnością sprawi, że zakres jego zastosowania wykroczy poza problemy związane z górnictwem.

Praca została wykonana w roku 2009 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

1. *Vibrating Wire Displacement Calibration Report*. Geokon Inc., 48 Spencer Str., Lebanon, New Hampshire, USA.
2. Kanciruk A. *Uniwersalny strunowy system pomiarowy*. (w:) Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN 2008, tom 10, nr 1-4, s. 25-32.
3. *Tablice fizyczno-astronomiczne*. Wydawnictwo Adamantan, Warszawa 1995.
4. Gustkiewicz J. i in., *Urządzenia do pomiaru odkształceń skał i ich zastosowanie*. W: III Dni Miernictwa Górniczego i Ochrony Terenów Górniczych - konferencja naukowo-techniczna. Ustroń-Zawodzie, 24-26 września 1995. SITG. (1995).
5. Praca zbiorowa pod redakcją J. Rogowskiej. *Wpływ przestojów frontu eksploatacji podziemnej na przebieg przemieszczeń i deformacji terenu*. Instytut Mechanik Górotworu PAN, Kraków 2004.
6. *Polska aparatura strunowa PAS*. Katalog. Zakład Aparatury Naukowej ZAN-UJ. Krajowy System Automatyki i Pomiarów „Polmatik”.

New vibrating-wire transducers and their application

Abstract

In the paper 2 new vibrating-wire transducers are presented: an extensometer and an inclinometer. The extensometer was designed for measuring ground displacements. Its case is of hermetic type, and resistant against environmental failure. After being tested the extensometer was installed in area of one of Upper Silesian mines, together with a vibrating-wire meter-recorder. A new method of installation was introduced too. Inclinometer is a prototype instrument. Its metrological parameters correspond with theoretical calculations. It can be used to observe the influence of underground mining exploitation on building structures.

Keywords: vibrating-wire transducers, geotechnical engineering